

1. 序論

長期的な噴火活動が継続している火山では、マグマヘッドの深さがマグマ供給率の変化を表すひとつの指標となる。溶岩湖が火口縁から見える火山の場合、深さの変化を比較的簡単にモニタリングできる。しかし、多くの火山では地形的制約によってマグマヘッドが見えないため、火口近傍で得られる地球物理データから深さを推定する必要がある。代表的な深さ推定手法として、爆発発生時のシグナル到来時間差を用いる手法が挙げられる（たとえば Sciotto et al., 2013）。この手法は、マグマヘッド表面に存在する爆発源で地震動と空振が同時に励起されると仮定して、シグナルの到来時間差から深さを見積もる。また、空振の卓越周波数を用いて深さを推定する手法も使われる（たとえば Johnson et al., 2018）。これは、マグマヘッドより上部の火道内の空間において共鳴が励起され、その共鳴周波数が空振の卓越周波数として観測されることを利用するものである。

上に挙げたいずれの手法も簡単に深さの推定ができるが、推定時に単純な仮定をおくために、深さを正確に求められない場合がある。変数のひとつである火道内音速は、火道内を満たす気体の温度や火山灰の含有率で大きく変化し、制約が難しい。深さの推定時には、計測されたガスの温度などを参考に、適当な音速値を仮定する。火道内空間での共鳴を考える際には火道の形状も重要な変数となるが、多くの研究では円筒火道を仮定する。しかし、これらのような単純な仮定によって、推定される深さ変化が現実と乖離してしまう可能性がある。そこで、本研究では上に挙げた 2 つの深さ推定手法を組み合わせることで、両手法に共通の変数である火道内音速を深さと同時に推定する手法を提案する。また、空振の倍音成分を用いて火道形状も制約する。そして、この手法を阿蘇火山の 2014–2015 年活動期に取得されたデータに適用して、マグマヘッドの深さの時間変化を推定し、活動期における噴火活動とマグマ供給率の関係について議論する。

2. 阿蘇火山 2014–2015 年活動期

阿蘇火山は熊本県北部に位置し、世界有数の広大なカルデラを有する活火山である。中岳には 7 つの火口からなる火口列が存在し、現在は第一火口のみで噴火活動がみられている。火山活動が低調な時期には、火口内に湯だまりとよばれる火口湖が出現するが、活動の活発化にともなって火口湖が消滅する。中岳第一火口では、2014 年 11 月 25 日から約 20 年ぶりの本格的な噴火活動が発生した。活発なストロンボリ式噴火と連続的な火山灰の噴出を主体とする活動が約半年間続いた（横尾・宮縁, 2015）。2015 年 5 月 3 日には、振幅の大きな火山性微動をともなって火口底南側が陥没した（気象庁, 2015）。この陥没をもって、噴火活動は終息した。本研究では噴火開始から陥没までの期間を「2014–2015 年活動期」とよび、この活動期におけるマグマヘッドの深さ変化を推定した。

3. 使用データとその特徴抽出

解析には、中岳第一火口近傍で取得された地震動・空振データを使用した。解析期間は 2014 年 11 月 28 日–2015 年 5 月 31 日である。この期間のデータには、爆発にともなう地震動・空振が多数みられていた。観

測点には、地震動が到来した約 1 s 後に空振が到来した。また、空振は表面現象によらず明瞭な卓越周波数を示しており、火道内で共鳴が励起されていたと考えられる (Yokoo et al., 2019)。STA/LTA 法 (1 s/40 s 窓) を用いて計 107,988 イベントを検出し、波形特徴にもとづいて波形タイプの分類を行った。周波数構造をもとに、地震動は 2 タイプ、空振は 6 タイプに分類した。特に、空振は時期によって主要なタイプが変化した。この変化にもとづいて、解析期間を 6 つの期間 (期間 P1–P6) に区分した。

検出したイベントから、深さ推定に用いる地震動と空振の到来時間差 (Δt)、空振の卓越周波数 (f_0) のデータセットを得た。検出時よりも短い時間窓を使用した STA/LTA 法 (0.1 s/1 s 窓) を適用して、シグナルの到来時刻を読み取った。このとき、検出基準は波形タイプごとに設定した。また、空振の到来時刻を基準に 40 s 間の波形を抜き出し、振幅スペクトルを計算して卓越周波数を得た。1 日ごとにシグナル到来時間差と空振の卓越周波数の確率密度分布を取得した。

4. マグマヘッドの深さ推定手法の提案

観測された地震動・空振の励起過程を次に示すモデルのように仮定した。まず、爆発やガスの噴出によって、マグマヘッドより上部の火道内の空間において共鳴が励起される。共鳴周波数は空間のサイズと火道内音速で規定されるため、観測された空振の卓越周波数 f_0 は、マグマヘッドの深さ d と火道内音速 c の関数として $f_0 = F(d, c)$ と表せる。この関数は火道形状に依存するため、空振の倍音成分 f_1 と f_0 の両方を励起できる形状を制約する。ストロンボリ式噴火の発生時には、マグマヘッド表面で発生した爆発によって地震動と空振が同時に励起され、それぞれ地盤中と大気中を観測点まで伝わる。このとき、これらのシグナルの到来時間差 Δt も $\Delta t = G(d, c)$ の形で表せる。したがって、 $f_0 = F(d, c)$ と $\Delta t = G(d, c)$ を組み合わせることで、マグマヘッドの深さ d を推定することができる。

関係式 $f_0 = F(d, c)$ を得るために、空振の卓越周波数 (共鳴周波数の基本モード) と倍音成分の周波数比を用いて、火道の形状を制約した。火道が片側閉口端の管であると考え、第一倍音と基本モードの周波数比 (f_1/f_0) は、開口端 (open-end) と閉口端 (closed-end) の半径の比 (a_o/a_c) によって一意に決まる (Ayers et al., 1985)。2015 年 4 月 25 日のデータを例に、この関係から半径比を求めると $a_o/a_c < 1$ となり、火道形状は出口が狭まる円錐台であることがわかった。この形状を仮定して空振伝播の数値シミュレーションを実施し、 $f_0 = F(d, c)$ の関係を得た。

得られた $f_0 = F(d, c)$ と $\Delta t = G(d, c)$ を組み合わせると、深さと 2 つの観測値 (f_0 と Δt) のみの関数になる ($\mathcal{H}(d, f_0, \Delta t) = 0$)。 f_0 と Δt の値のペアが与えられたときに、この方程式を満たす d を探すことで、深さが得られる。しかし、実際に観測された f_0 と Δt のペアのほとんどに対して、現実的な深さと火道内音速の解が存在しなかった。特に、観測された Δt のばらつきを説明できなかった。そこで、火道形状が深くなるほど径の広がる円錐台であったことをふまえて、火道内に溶岩湖が存在し湖面のさまざまな場所で爆発が発生していると考えた。このとき、爆発時に励起される地震動は、最初に溶岩湖中を通過し、溶岩湖の岸から観測点までは地盤中を伝播すると仮定する。このようにモデルを修正することで、爆発発生位置の水平変化によって観測された Δt のばらつきを説明できるようになった。推定された深さは、シグナル到来時間差のみを使って推定された深さよりも狭い領域 (60–190 m) となった。また、円錐台形状の火道を仮定したことで、単純な円筒火道を仮定して空振卓越周波数から推定された深さよりも浅くなった。

5. 2014–2015 年活動期におけるマグマヘッドの深さの時間変化

上記の手法を 2014–2015 年活動期全体のデータに適用して、マグマヘッドの深さの時間変化を推定した。推定にあたって、火口地形、火口形状、マグマ中の地震波伝播速度の時間変化を仮定および制約した。現地で観測された火孔径と火砕丘リム径 (Yokoo et al., 2019) をもとに火口内地形データを作成し、空振伝播の数値シミュレーションに使用した。火道形状は、共鳴周波数の第一倍音と基本モードの周波数比を用いて 1 日ごとに制約した。その結果、活動期最初は円筒であった火道形状は、深くなるほど径の広がる円錐台に変化したことがわかった。また、マグマ中の地震波伝播速度も、観測されたシグナル到来時間差の分布を説明できるように、1 日ごとに制約した。

火口地形、火口形状、マグマ中の地震波伝播速度の時間変化をふまえてマグマヘッドの深さを推定した。その結果、噴火開始約 1 ヶ月後の期間 P2 (2015 年 1 月 9 日~1 月 31 日) にマグマヘッドが上昇した。活動期最初の深さは 200 m 程度であったが、期間 P2 に徐々に上昇し深さ 120 m ほどにまで達した。その後は、期間 P4 (2015 年 3 月 21 日~4 月 3 日) の直前、期間 P5 (2015 年 4 月 4 日~5 月 3 日) の最初にわずかに上昇する様子がみられたものの、噴火活動が終息するまで浅い領域にとどまっていた。期間 P5 の終盤には 50 m ほどマグマヘッドが低下し、その直後の 2015 年 5 月 3 日の夜間に火口底が陥没した。また、同時に推定された火道内音速は、活動期を通して広い範囲に分布しており、有意な時間変化はみられなかった。

6. 議論

推定されたマグマヘッドの深さ変化と他の観測項目の時間変化を比較して、活動期における噴火活動とマグマ供給率の関係について議論した。マグマヘッドの上昇がみられた期間 P2 に先立って、火山浅部での膨張を示す地盤変動が観測されていた (気象庁, 2015; 京都大学, 2015)。また、期間 P2 中の 1 月中旬には、火山灰に含まれる淡褐色のガラス片の割合が増加し、マグマが急速に冷却されるようになったことが示唆されている (Miyabuchi & Hara, 2019)。これらの事実から、期間 P2 にはマグマ供給率が増加し、火道浅部に新鮮なマグマが上昇してきていたと考えられる。また、マグマヘッドのわずかな上昇がみられた期間 P4 の直前や期間 P5 の最初にも、傾斜計・伸縮計記録のトレンドが変化しており、この時期に供給の変化があった可能性がある。

マグマヘッドが上昇した期間 P2 には、火道形状が円筒から円錐台へと変化した。この形状変化は、上昇したマグマヘッドの熱によって、火道壁が劣化・崩落することによって生じたと考えられる。火孔サイズより水平方向に広い空間が火口底下に存在する形状は、実際にキラウエアやビジャリカなどでも観測されており (たとえば Palma et al., 2008; Orr et al., 2013)、物理的に不安定であるものの複数の火山に共通した特徴である可能性がある。活動期最後の火口底陥没は、もともと火道形状が物理的に不安定であったところに、マグマのドレインバックが重なって生じたと考えられる。

空振は時期によって主要なタイプが変化した。噴火時の火山灰噴出の有無と観測される波形タイプとの間に関連がみられた。また、波源の変化によって共鳴の励起のされ方が変化した可能性が示唆された。シグナル到来時間差のばらつきから制約されたマグマ中の地震波伝播速度にも、時間変化がみられた。この変化は、マグマヘッド表面に含まれる気相の体積分率を反映している可能性がある。一般的に、ストロンボリ式噴火発生時のマグマヘッドの最上部には、High-Viscosity Layer (HVL) とよばれる脱ガスしたマグマの層があるといわれる (たとえば, Capponi et al., 2016)。地震波伝播速度の時間変化は、この HVL の形成・消滅を反映して

いるのかもしれない。

以上をふまえると、2014–2015 年活動期は次のように解釈できる。噴火最初期の期間 P1 は、マグマヘッドが十分に上昇し切っておらず、火道内がまだ不安定な状態であった。しかし、期間 P2 の直前に新しいマグマが貫入し、徐々にマグマヘッドが上昇する。このとき火道形状も円筒から円錐台へと変化する。その後、期間 P3 にはマグマヘッドの上昇が止まり、火山灰噴出率も低下する。期間 P4 には、噴石の飛散をともなう爆発や火山灰の噴出がみられなくなるが、噴出するガスフラックスが増加したため、大振幅の空振が継続的に励起される。期間 P5 には一時的に噴石の飛散や火山灰の噴出が再開する。50 m ほどのマグマヘッドのドレインバックにより、火口底が陥没する。陥没後の期間 P6 には、火道内の空間が潰されたために明瞭な共鳴周波数がみられなくなる。

7. 結論

本研究では、阿蘇火山 2014–2015 年活動期を対象に、噴火時に観測される複数の観測値を統一的に説明できるようにマグマヘッドの深さを推定した。そのために、従来用いられていた 2 つの深さ推定手法を組み合わせて、新たな推定手法を提案した。共鳴周波数の基本モードと倍音の周波数比から火道形状を制約し、地震動および空振のシグナル到来時間差と空振の卓越周波数を用いて、マグマヘッドの深さと火道内音速の両方を同時に推定した。2015 年 4 月 25 日のデータを例に用いると、火道形状は深くなるほど径の広がる円錐台であり、マグマヘッドの深さは 60–190 m と推定された。この深さは、シグナル到来時間差のみを使って推定された結果よりもばらつきが小さくなった。また、円筒火道を仮定して空振卓越周波数から推定される深さよりも浅くなった。提案した推定手法を活動期全体のデータに適用したところ、噴火開始約 1 ヶ月後の 2015 年 1 月ごろからマグマヘッドが浅部に上昇し、その後、噴火活動の終息まで浅い領域にとどまっていたことがわかった。マグマヘッドの上昇時には、浅部の地盤変動や火山灰の特徴からもマグマ供給率の増加が示唆された。活動期の最後にはマグマヘッドが 50 m 程度低下し、火口底が陥没したと考えられる。

本研究は、マグマヘッドの深さ推定時に火道形状の時間変化を考慮することが重要であることを示した。より現実的な形状を制約する際には、空振伝播の数値シミュレーションを用いて、倍音成分や周波数構造を再現できるような条件を探ることが必要となる。また、火口内地形の定期的なモニタリングが、火道形状の制約条件を与えるだろう。今後、傾斜・伸縮記録の詳細な解析結果と比較することで、阿蘇火山の噴火活動を維持するマグマの供給メカニズムの理解につながると考えられる。